

В случае стационарного режима насыщения формируется диффузионный слой с равномерно распределенной микротвердостью. Максимальное значение которой достигнуто на поверхности, а по мере прохождения слоя, плавно уменьшается к основной микроструктуре.

Азотирование с применением термоциклирования в условиях печного нагрева позволяет интенсифицировать диффузию азота, скорость формирования диффузионного слоя, а также повысить свойства диффузионного слоя по сечению и на поверхности доэвтектоидной стали. Тем самым за равный промежуток времени (8 ч) при термоциклировании формируется на 15...20 % большая толщина термодиффузионного слоя, более высокая микротвердость поверхности и зон диффузионного слоя на основе фаз  $\gamma'$  и  $\epsilon'$ , а также зоны внутреннего насыщения. Интенсификация процессов достигается за счет: градиента температуры и напряжений в поверхностном слое стального изделия; формирования растягивающих напряжений на поверхности во время стадии охлаждения образца [3-6], интенсивности теплосмен в единицу времени (не менее 8 раз за 8 ч) при одинаковой общей продолжительности насыщения.

При нестационарном режиме с частотой менее 1 термоцикла в час толщина слоя практически не отличается от стационарного режима и составляет 0,25 мм (за 8 ч). Также следует отметить, что термоциклирование с полной фазовой перекристаллизацией в условиях печного или индукционного нагревов оказывает интенсифицирующее воздействие на перемещение диффундирующих атомов в металлической матрице. Основными причинами быстрого формирования слоя являются: микропластическая деформация зерен, последующие процессы рекристаллизации зерен, а также мелкозернистая структура на протяжении всего цикла насыщения [5-6].

#### Список использованных источников

1. Гурьев, А.М. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / А.М. Гурьев, Л.Г. Ворошнин, Ю.П. Хараев // Ползуновский вестник. Часть 2, 2005. – № 2. – С. 36-44.
2. Белашова, И.С. Интенсификация процессов азотирования деталей авиационной / Белашова И.С., А.О. Шашков. // Электронный журнал «Труды МАИ». В. № 47. 2014
3. Лыгденов, Б.Д. Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.01 / Б.Д. Лыгденов. – Барнаул, 2009. – 29 с.
4. Герцрикен, С.Д. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе / С.Д. Герцрикен, И.Я. Дехтяр. – М.: Физматгиз, 1960. – 564 с.
5. Забелин, С.Ф. Основы технологии и кинетической теории процессов диффузионного насыщения сталей в условиях термоциклического воздействия на материал: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 / С.Ф. Забелин. – Чита. 2004. – 254 л.
6. Константинов, В.М. Структурообразование диффузионных слоев на конструкционных сталях при циклическом нагреве / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, В.М. Семенченко // Наука и инновации: сб. научн. труд. VII междунар. научн.-практической конф., Przemysl, 7-15 октября 2011 г. / редкол.: Targalski и [др.]. – Przemysl, 2011. – С. 6-8.

УДК 621.793

#### ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДЕФОРМАЦИОННЫМ ПЛАКИРОВАНИЕМ

Пилипчук Е.В.

Белорусский национальный технический университет

**Abstract.** *The results of a comparative assessment of the corrosion resistance of coatings based on chromium, formed by the methods of galvanic deposition and electro-formation cladding with a flexible tool (EDPGI) are presented. It is shown that the clad chromium coat-*

*ings have a higher corrosion resistance compared to the uncoated sample, however, they are inferior in this indicator to chrome coatings obtained by galvanic deposition. Therefore, the use of clad chrome coatings is most appropriate for parts operating in the absence or minimal aggressive effect of salts, acids and precipitation, for example, for parts of hydraulic drives of metal-cutting machines.*

**Введение.** Технология электродеформационного плакирования гибким инструментом (ЭДПГИ), где слой покрытия на поверхности детали формируется из переносимых ворсом вращающейся щетки микрочастиц материала – донора, а для интенсификации процесса переноса подается электрическое напряжения на ворс щетки и материал-донор, успешно апробирована и внедрена на Минском заводе автоматических линий им. П.М. Машерова для формирования хромовых покрытий на рабочих поверхностях штоков гидроцилиндров металлорежущих станков [1]. В ходе лабораторных и производственных испытаний установлено, что плакированные хромовые покрытия, сформированные на рабочих поверхности штоков гидроцилиндров, обеспечивают удовлетворительную работоспособность и соответствуют предъявляемым техническим требованиям. Однако, до настоящего времени, остались неизученными вопросы, связанные с определением коррозионной стойкости плакированных хромовых покрытий. В связи с этим **цель исследований** заключалась в сравнительной оценке коррозионной стойкости хромовых покрытий, сформированных методами ЭДПГИ и гальванического осаждения.

**Методика исследований.** Для проведения испытаний были подготовлены цилиндрические образцы (рис. 1) из стали 20Х, диаметром 14...16 и длиной 45 мм, имеющие после цементации и объемной закалки твердость поверхности 53...56 HRC.



Рисунок 1 – Фото цилиндрических образцов с хромовым покрытием до проведения испытаний на коррозионную стойкость: Г – образец с гальваническим хромовым покрытием; К1, К2, К3 – образцы с хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПГИ из композитов на основе хрома; Б/П – образец без покрытия

На цилиндрической поверхности образцов методами гальванического осаждения и ЭДПГИ формировались покрытия из хрома. При этом гальваническое хромирование с осаждением слоя хрома толщиной 10...12 мкм выполняли по типовой технологии, используемой в ЗАО «Синта» (РБ). Для формирования покрытий методом ЭДПГИ, в качестве материалов-доноров использовали компактированные бруски, полученные путем спекания смесей (таблица 1) из порошков хрома (Cr), цинка (Zn), меди (Cu), кар-

бида вольфрама (WC), карбид вольфрама с кобальтом (BK), гексагонального нитрида бора (NB), терморасширенного графита (TRG) и алмазнографитной шихты УДАГ, предварительно подвергнутых перемешиванию и механоактивации в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 2 часов.

Формирование хромовых покрытий методом ЭДПИ осуществляли цилиндрической щеткой диаметром 200 и шириной 30 мм с ворсом из гофрированной проволоки из стали 03X17H14M2 (производства фирмы (OSBORN, Германия). Вылет и диаметр ворса щетки составляли, соответственно 30 и 0,25 мм. Линейная скорость вращения щетки - 32...35 м/с. Число проходов - 8 при натяге ворса щетки к поверхности образца 1,0 мм, сила тока, протекающего в зоне контакта донора с металлическим ворсом – 140 А. Толщина слоя сформированного покрытия не превышала 6...8 мкм.

Сравнительную оценку коррозионной стойкости хромовых покрытий проводили путем погружения образцов с покрытиями в 3 % водный раствор NaCl и выдержкой их в растворе до появления первых очагов коррозии. При этом каждый образец погружался в отдельную емкость. В качестве критерия оценки коррозионной стойкости принималось время до возникновения первых очагов коррозии. Выявление очагов коррозии осуществляли визуально путем периодического осмотра поверхности образцов через каждые 5 минут после их извлечения из емкости с раствором.

**Результаты исследований.** При анализе рентгенофлуоресцентных спектров поверхности образцов материалов доноров и покрытий из этих материалов установлено, что химический состав поверхности материалов покрытий существенно отличается от химического состава материалов доноров. При этом главной отличительной особенностью является появление в слое покрытия достаточно большого количества железа Fe, процентное содержание которого находится в интервале 73,18...75,47 (табл. 1).

Таблица 1. – Химический состав спеченных материалов-доноров на основе хрома и сформированных из этих материалов покрытий по результатам рентгенофлуоресцентного анализа

№		C	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	W	Cu	Co	N	Al
K1	Донор	6,36	-	-	84,88	-	-	-	-	9,03	-	-	-	-
	Покрывне	1,11	-	0,34	12,15	1,29	75,47	5,6	-	-	-	-	-	-
K2	Донор	8,26	-	-	76,18	-	0,3	-	-	8,86	5,79	0,6	-	-
	Покрывне	3,04	3,61	0,34	10,51	1,27	76,09	5,08	-	0,04	-	-	-	-
K3	Донор	4,96	-	-	80,28	-	-	-	-	9,72	4,28	0,76	-	-
	Покрывне	3,52	4,47	0,23	10,97	1,34	73,18	5,18	-	0,4	0,28	-	0,44	-

Появление железа в слое покрытия, по-видимому, можно объяснить тем, что в процессе его формирования ворсинки щетки, наряду с частичками материала донора срезают и привносят в образующийся слой частички материала стальной основы образца. При этом появление никеля Ni в слое покрытия свидетельствует о том, что и частички материала проволоочного ворса щетки также привносятся в слой покрытия.

Анализ данных по коррозионной стойкости хромовых покрытий показал, что в условиях проводимых испытаний образцы с гальваническим с хромовым покрытием обладает наилучшей коррозионной стойкостью. После двухчасовой выдержки образцов в солевом растворе на поверхности хромового покрытия видимых очагов коррозии обнаружено не было. Самым низким показателем коррозионной стойкости обладают образцы без покрытия. Время до возникновения первых очагов коррозии для этих образцов составило 25 минут. Для образцов с хромовыми покрытиями, сформированными методом ЭДПИ, время до возникновения первых очагов коррозии составило: 50 мин – для покрытия из хромового композита K1, и по 40 мин для покрытий из хромовых композитов K2 и K3, соответственно.

**Выводы.** Исходя из результатов проведенных исследований становится очевидным, что хромовые покрытия, сформированные методом ЭДПГИ, имеют более высокую коррозионную стойкость, по сравнению с непокрытыми образцами, однако, значительно уступают по этому показателю хромовым покрытиям, полученным гальваническим осаждением.

Сравнительно невысокая коррозионная стойкость покрытий, сформированных методом ЭДПГИ из спеченных материалов доноров на основе хрома, объясняется тем, что в сформированном слое покрытия присутствует большое количество (до 73...76%) элементов железа Fe, которое привносится ворсом щетки из поверхности обрабатываемой детали в процессе его формирования и является потенциальным активатором коррозии, в особенности, в сочетании с кислородом. Поэтому данный вид покрытий целесообразно формировать на рабочих поверхностях деталей работающих в условиях не подверженных агрессивному воздействию солей, кислот и атмосферных осадков, например, на деталях гидроприводов металлоорежущих станков.

#### **Список использованных источников**

1. Леванцевич, М.А. Износостойкость легированных хромовых покрытий, сформированных способом деформационного плакирования с электрическим напряжением / М.А. Леванцевич, Е.В. Пилипчук, В.К. Шелег, В.Н. Калач // Актуальные вопросы машиноведения: сб. научн. трудов / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – 2017. – Вып. 6. – С. 159–162.

УДК 621.926.9

### **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДРОБЛЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ**

*Писарев Д.Ю., Яковлев Е.С., Басалай Г.А.*

*Белорусский национальный технический университет*

**Abstract.** *The paper analyses the performance of the rock fragmentation equipment in potassium fertilizer manufacture. It recommends an algorithm to specify basic structural performance parameters of the pulverator.*

Измельчение руды при производстве калийных удобрений производится в молотковых дробилках. Молотковая дробилка – механическая дробильная машина, применяемая для разрушения кусков, зёрен и частиц минерального сырья и аналогичных материалов, путём дробления породы ударами молотков, шарнирно закреплённых на быстро вращающемся роторе, а также методом разрушения кусков при ударах о плиты корпуса дробилки.

Молотковые дробилки подразделяются на:

- однороторные нереверсивные молотковые дробилки (для дробления хрупких и мягких малоабразивных материалов);
- двухроторные молотковые дробилки с решётками (для хрупких материалов прочностью до 1000 кгс/см<sup>2</sup> и влажностью до 10%;
- двухроторные реверсивные дробилки с решётками (для мелкого дробления материалов средней прочности и влажности).

**Принцип работы.** Дробление материала в молотковых дробилках осуществляется свободным ударом быстро вращающихся молотков по кускам материала (наиболее эффективный способ), ударом кусков материала о специальные отбойные плиты, на которые они отбрасываются молотками, и крошением (раздавливанием и истиранием) материала молотками на колосниковой решётке.

В зависимости от конструкции дробилок при их работе применяются все три вида дробления или только первые два из них.